

Fleksibilna kolaborativna robotska celica za površinsko obdelavo s hitrim intuitivnim učenjem in hologramskim vmesnikom

Saša Stradovnik, Rok Pučko, Mitja Golob, Matjaž Divjak, Dimitrije Prelević, Aleš Hace
Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko
Koroška c. 46, 2000 Maribor
sasa.stradovnik@um.si, rok.pucko@um.si, mitja.golob@um.si, matjaz.divjak@um.si,
dimitrije.prelevic1@um.si, ales.hace@um.si

Flexible collaborative robot cell for surface treatment with fast intuitive learning and holographic interface

In industry, we often encounter surface treatment technologies, where the tool must accurately follow the path along the surface of a geometrically complex workpiece. This is one of the most complex tasks for robotization. As a result, the use of expensive CAD/CAM software is inevitable and working with them requires highly skilled and experienced workers. Consequently, a lot of time and effort to prepare a robot program is required. In this paper, we present a work cell that enables fast and intuitive learning of collaborative robots based on the physical interaction between a robot and a human. This allows flexible definition of robot task without requiring deep knowledge of robot programming and the use of additional CAD/CAM software tools, resulting in more time-efficient work. The extension with the holographic interface provides improved additional possibilities of 3D representation of information by placing holograms in a robot work cell with the possibility of a simple way of defining technological parameters. The concept of a flexible collaborative robotic cell is presented using an experimental laboratory application for surface treatment as an example.

Kratek pregled prispevka

V industriji se pogosto srečamo s tehnologijami površinske obdelave, pri katerih je potrebno z orodjem natančno slediti poti po površini geometrijsko kompleksnega obdelovanca, kar predstavlja eno izmed zahtevnejših nalog za robotizacijo. Posledično je potreba po uporabi dragih CAD/CAM programskih orodij v trenutni industrijski praksi skoraj neizogibna, delo z njimi pa zahteva visoko usposobljen in izkušen kader ter veliko vložene časa in truda za pripravo robotskega programa. V članku predstavljamo delovno celico, ki vključuje hitro intuitivno učenje kolaborativnega robota na podlagi fizične interakcije med človekom in robotom. To omogoča fleksibilno definiranje robotske naloge brez potrebe po poglobljenem znanju o programiranju robotov in uporabi dodatnih CAD/CAM programskih orodij, s čimer dosežemo časovno bolj učinkovito delo. Razširitev z uporabo hologramskega vmesnika daje nove in izboljšane možnosti 3D predstavitve informacij z umeščanjem hologramov v delovno celico robota z možnostjo preprostega načina definiranja tehnoloških parametrov. Koncept fleksibilne kolaborativne robotske celice je predstavljen na primeru eksperimentalne laboratorijske aplikacije za površinsko obdelavo.

1 Uvod

Temeljne postopke mehanske obdelave površin, kot so brušenje, poliranje, mikrokovanje itd. pogosto srečamo v orodjarski industriji. Ti postopki se še vedno izvajajo večinoma ročno, kar pa je za človeka precej naporno. Razlog za to, da tovrstni postopki še vedno niso avtomatizirani oz. robotizirani se skriva predvsem v tem, da je postopek priprave robotskega programa glede na kompleksnost proizvodnih procesov in raznolikost maloserijske proizvodnje v orodjarstvu preveč tog in glede na trenutno razpoložljive tehnologije precej drag. Trenuten postopek priprave programa za površinsko obdelavo v industrijski praksi vključuje uporabo dragih namenskih CAD/CAM programov kot so SprutCAM, Robotmaster, MasterCAM, SolidCAM ipd. Le-ti pa za njihovo uporabo zahtevajo visoko usposobljen inženirski kader in veliko vložnega časa ter truda za pripravo robotskega programa. S takšnim pristopom podjetja, ki se morajo zaradi narave naročniške proizvodnje nenehno prilagajati zahtevam kupcev, težko dosegajo optimalno delo ter konkurenčnost na trgu. Poleg tega specifičnost tovrstnih aplikacij zahteva dodatne zmogljivosti, ki jih večina CAD/CAM programskih paketov zaenkrat še ne vključuje.

Z razvojem kolaborativnih robotskih sistemov se odpirajo nove možnosti robotizacije, ki stremijo k hitrejšemu in bolj enostavnemu programiranju robotov ter fleksibilnejšemu izvajanju nalog z njihovo komplementarno razdelitvijo med robota in človeka, kadar popolna robotizacija ni mogoča ali pa le-ta ni ekonomsko sprejemljiva. Današnja stopnja razvoja kolaborativnih robotskih sistemov omogoča fleksibilno uporabo predvsem za potrebe relativno enostavnih aplikacij robotske manipulacije [1, 2], ne vključujejo pa palete naprednih funkcionalnosti, ki bi omogočale fleksibilno izvajanje bolj sofisticiranih robotskih nalog. Da bi to dosegli, je potrebno razviti in implementirati namenske algoritme, ki bodo omogočali fleksibilno uporabo kolaborativnih

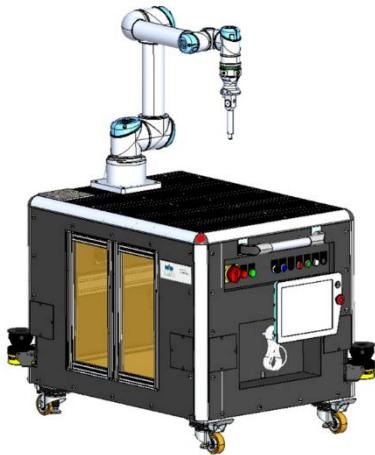
robotskih sistemov tudi v primeru bolj kompleksnih nalog. Z vključevanjem novih podpornih tehnologij, ki omogočajo intuitiven prostorski prikaz informacij pa se odpirajo tudi dodatne, izboljšane možnosti uporabe teh robotskih tehnologij. Eden izmed načinov, da to učinkovito dosežemo, je z uporabo holografskih naprav in t.i. tehnologije mešane resničnosti.

Mešana resničnost (ang. Mixed Reality) je tehnologija, ki omogoča umeščanje dodatnih digitalnih informacij v realni svet in na ta način omogoča prepletanje resničnega in virtualnega sveta. Aplikacije mešane resničnosti se razvijajo predvsem v smeri grafičnega prikazovanja 3D virtualnih objektov v prostoru, vključujejo pa tudi prostorsko predstavitev zvočnih signalov, zajem vhodnih podatkov iz okolja preko kretenj, prepoznavo objektov in glasov ter njihovo lokalizacijo. Ta tehnologija, v kombinaciji s kolaborativnimi robotskimi sistemi, prinaša številne nove, izboljšane možnosti komunikacije med robotom in človekom.

V članku predstavljamo fleksibilno kolaborativno robotsko celico za površinsko obdelavo razgibanih 3D površin, delovanje pa demonstriramo v našem laboratorijskem okolju. Fleksibilna kolaborativna robotska celica je načrtovana tako, da za razliko od konvencionalnih postopkov priprave robotskega programa s pomočjo CAD/CAM programskih paketov, omogoča hitro definiranje robotske naloge. Posledično lahko s takšnim pristopom dosežemo bolj robustno in časovno bolj optimalno prilagodljivost robotskega sistema glede na potrebe malo serijske in raznolike proizvodnje orodjarn. Prilagajanje robota na izvajanje novih nalog z minimalnim učenjem je poenostavljeno do te mere, da ga lahko upravlja vsak človek. Področje površine, ki jo je potrebno obdelati določi človek preko kinestetičnega vodenja robota, pri čemer zagotavljamo zadosten nivo varnosti v skladu s tehnično specifikacijo ISO/TS 15066, kot sestavni del standarda ISO 10218 [3, 4]. Dodatne funkcionalnosti daje možnost uporabe hologramskega vmesnika, ki omogoča intuitiven prostorski prikaz in zajem informacij, kar lahko

izboljša razumevanje človeka o nastavitvah in izvajanju robotske naloge.

2 Kolaborativna robotska celica za površinsko obdelavo



Slika 1: Odrpna kolaborativna robotska celica za površinsko obdelavo.

Osnovna mehanska konstrukcija odrpne robotske celice (glej sliko 1) sestoji iz ALU profilov, ki omogočajo gradnjo primerno lahke, a hkrati tudi dovolj toge mobilne platforme, ki jo je mogoče ročno premikati po prostoru [5]. Premična robotska celica vključuje 6-osnega kolaborativnega robota UR5 [6] ter je zasnovana tako, da omogoča površinsko obdelavo s tehnologijo mikrokovanja tako obdelovancev manjših dimenzij, ki jih lahko pritrdimo na delovno mizo mobilne platforme, kot tudi obdelavo večjih in težjih obdelovancev z ročnim premikom mobilne platforme v njihovo bližino.

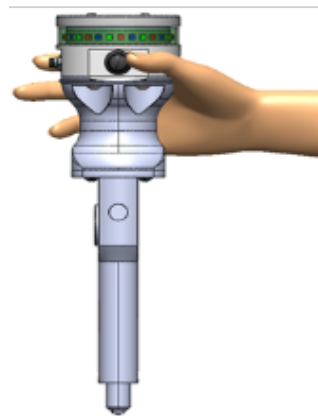
Varen dostop do mobilne robotske platforme v avtomatskem načinu delovanja zagotavljata dva varnostna laserska senzorja, ki nadzorujeta poseganje človeka v nevarno območje odrpne robotske celice. Komunikacija med robotom in človekom poteka preko fizičnega ter računalniškega grafičnega uporabniškega vmesnika in/ali hologramskega uporabniškega vmesnika.

2.1 Tehnologija mikrokovanja

Pri končni obdelavi površin orodij s tehnologijo mikrokovanja gre za postopek hladnega kovanja pri katerem mikrokovalo s kroglico iz karbidne trdnine z veliko frekvenco (200 Hz – 500 Hz) udarja po površini obdelovanca [7-10]. Z udarjanjem po površini povzročimo njeno plastično deformacijo, na podlagi katere lahko gladimo, utrjujemo in odpravljamo notranje napetosti na površini obdelovanca po rezkanju. Mikrokovalo z udarno kroglico vodimo površini obdelovanca s hitrostjo do približno 50 mm/s, nagib mikrokovala na obdelovalno površino vzdolž smeri potovanja mikrokovala pa je običajno takšen, da je udarna sila pravokotna na površino obdelovanca. V primeru geometrijsko razgibane površine obdelovanca je torej potrebno sproti prilagajati orientacijo mikrokovala, medtem ko se ta premika po obdelovalni poti.

2.2 Uporabniški vmesniki

Upravljanje robotskega sistema je možno preko fizičnega vmesnika, grafičnega vmesnika na računalniškem zaslonu in/ali hologramskega uporabniškega vmesnika.

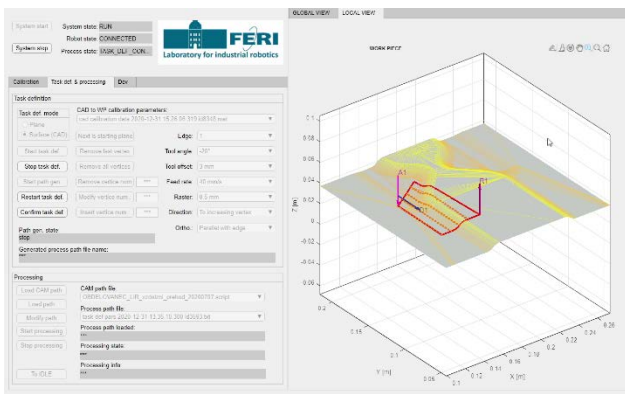


Slika 2: Fizični uporabniški vmesnik.

Fizični uporabniški vmesnik omogoča definiranje robotske naloge s pomočjo kinestetičnega vodenja robota. Ergonomsko oblikovano držalo (glej sliko 2) na vrhu robota omogoča enostavnejše kinestetično premikanje robotske roke. Na njem sta nameščeni dve tipki. Modra tipka omogoča aktivacijo kinestetičnega načina vodenja, črna pa je specifična

programska tipka, ki omogoča shranjevanje pozicije TCP (ang. Tool Center Point) točke. Kontrolni signalni obroč služi kot enostaven interaktivni uporabniški vmesnik. Omogoča posredovanje svetlobnih in zvočnih signalov.

Grafični uporabniški vmesnik (glej sliko 3) omogoča upravljanje robotskega sistema ter s tem izvajanje in nastavitve postopkov kalibracije lege obdelovanca, definiranja obdelovalne naloge in njene izvedbe. Omogoča tudi spremljanje stanja sistema, robota in procesa ter grafičen prikaz obdelovalnih poti na obdelovancu.



Slika 3: Grafični uporabniški vmesnik.



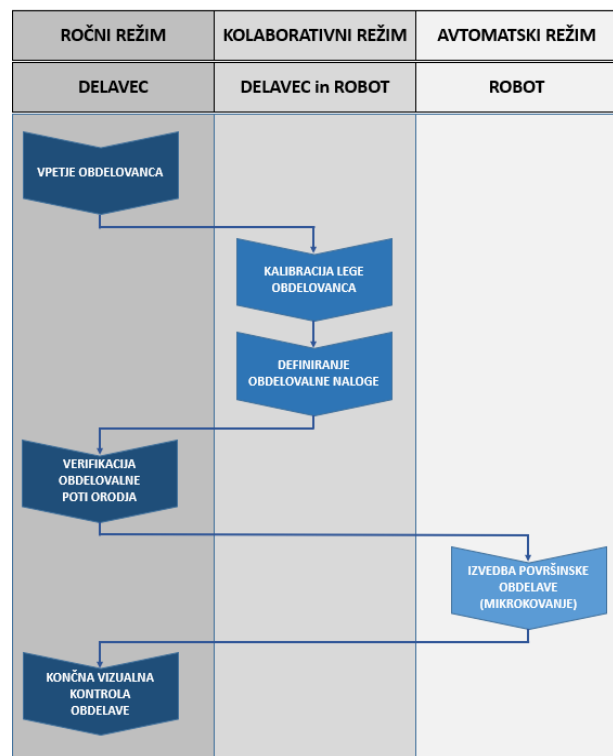
Slika 4: Hologramski uporabniški vmesnik.

Vzporedno z grafičnim uporabniškim vmesnikom je mogoče enakovredno upravljati s sistemom tudi preko hologramskega uporabniškega vmesnika (glej sliko 4). Hologramski uporabniški vmesnik temelji na uporabi očal za mešano resničnost Hololens [11]. Omogoča upravljanje s sistemom na bolj intuitiven način s prostorskim prikazom informacij v obliki hologramov, ki so umeščeni v realni svet ter komunikacijo z njimi preko

kretenj. Uporabnik lahko te informacije po potrebi prikaže ali skrije.

3 Tehnološki scenarij robotskega mikrokovanja

Tehnološki scenarij mikrokovanja s kolaborativnim robotom je razdeljen na več delovnih operacij [12] (glej sliko 5). Posamezne delovne operacije lahko razdelimo glede na izvajalca aktivnosti v posamezni delovni operaciji. Delovno operacijo lahko izvaja delavec v ročnem režimu, robot v avtomatskem režimu ali pa gre za opravljanje skupne aktivnosti v kolaborativnem načinu v okviru katerega je mogoča tudi podpora s hologramskim vmesnikom.



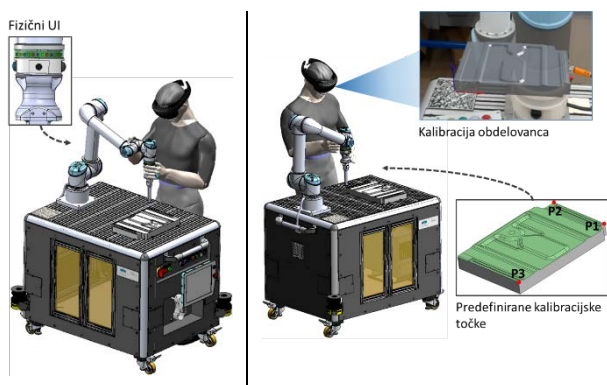
Slika 5: Tehnološki scenarij robotskega mikrokovanja.

Po stabilizaciji mobilne platforme in kalibraciji robota ter hologramskega vmesnika je sistem pripravljen za uporabo. Postopek se začne z vpetjem obdelovanca. Sledi kalibracija pozicije obdelovanca in definiranje obdelovalne naloge, ki vključuje določitev območja obdelave in definiranje tehnoloških parametrov na podlagi katerih se generira pot po površini obdelovanca. Po potrditvi generirane

obdelovalne poti se izvrši izvedba obdelovalne naloge na realnem robotu.

3.1 Kalibracija lege obdelovanca

V okviru kalibracijskega postopka za določitev lege obdelovanca (glej sliko 6), je potrebno iz podatkovne baze najprej izbrati ustrezen tip obdelovanca preko grafičnega uporabniškega vmesnika. Za določitev pozicije in orientacije obdelovanca je potrebno s konico orodja robota v pravilnem zaporedju odtipati tri kalibracijske značilke. Tipanje kalibracijskih značilk se izvede s pomočjo kinestetičnega vodenja in z uporabo fizičnega uporabniškega vmesnika. Aktivacijo kinestetičnega vodenja robota sprožimo s pritiskom na moder gumb, pri čemer postane robot prosto podajen. S pritiskom na črn gumb pa potrdimo pozicijo posamezne kalibracijske značilke. Pomoč pri izvedbi postopka kalibracije uporabniku nudi grafični ali hologramski vmesnik, ki ga vodi skozi proces s prikazom pozicije kalibracijskih značilk na virtualnem obdelovancu. Na podlagi potipanih kalibracijskih značilk kalibracijski algoritem samodejno določi lego obdelovanca, glede na katero generiramo robotsko pot v nadaljevanju.

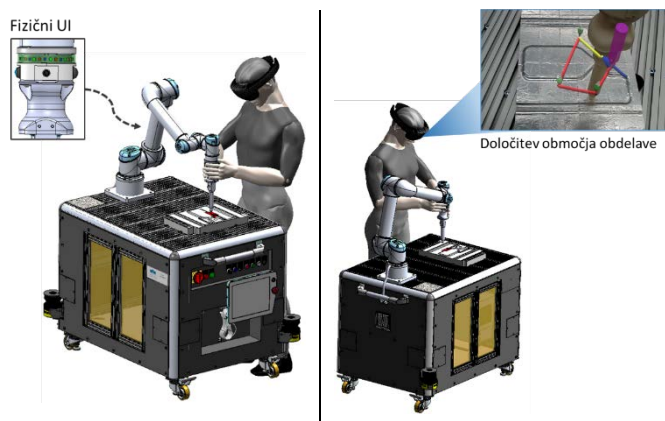


Slika 6: Kalibracija lege obdelovanca.

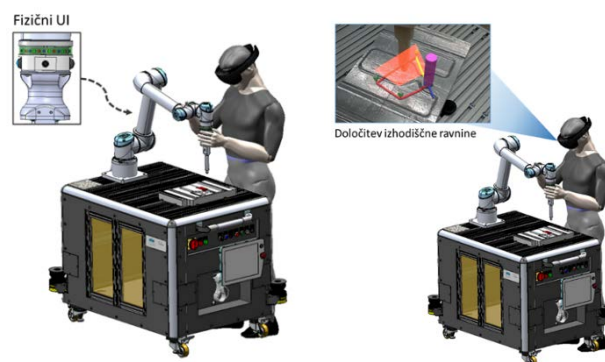
3.2 Definiranje obdelovalne naloge

Določitev območja obdelave s pomočjo kinestetičnega vodenja robota poteka na način, da človek določi vse mejne točke obdelovalne površine tako, da se z vrhom orodja dotakne površine obdelovanca (glej sliko 7). Aktivacijo kinestetičnega vodenja robota sproži s pritiskom na moder gumb, pri čemer postane robot prosto

podajen. S pritiskom na črn gumb pa se izvede shranjevanje posamezne mejne točke, katere pozicija je določena s pozicijo trenutne TCP točke robota. Hologramski vmesnik omogoča neposreden grafični prikaz definirane površine, glede na trenutno odtipane točke.



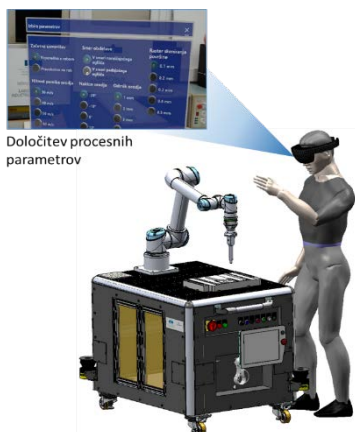
Slika 7: Definiranje obdelovalne naloge.



Slika 8: Definiranje izhodiščne ravnine orodja.

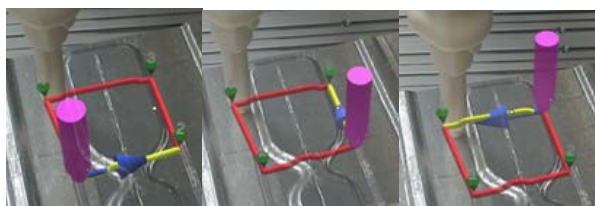
Poleg definiranja področja obdelave, je potrebno določiti tudi izhodiščno ravnino orodja (glej sliko 8), ki mora biti definirana tako, da se lahko robot varno, brez kolizij odmakne od obdelovalne površine. Tudi izhodiščna ravnina se določi preko kinestetičnega vodenja robota in po potrebi prikaže preko hologramskega vmesnika.

Parametre robotske naloge lahko določimo preko grafičnega ali hologramskega vmesnika (glej sliko 9). Sistem je zastavljen tako, da uporabniku ponudi privzete nastavitve, ima pa tudi možnost modifikacije le-teh.



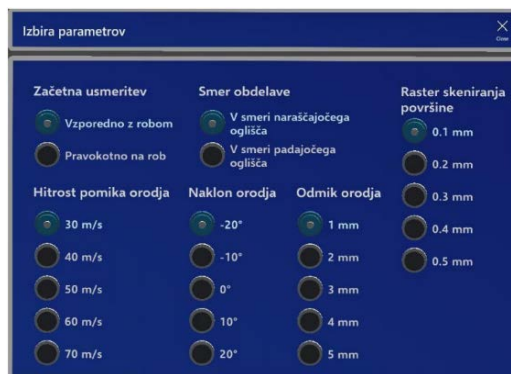
Slika 9: Nastavitev tehnoloških parametrov preko hologramskega vmesnika.

Z izbiro izhodiščne stranice definiranega mnogokotnika določimo vodilno črto (glej sliko 10) na podlagi katere bodo generirane poti po definiranem obdelovalnem področju.

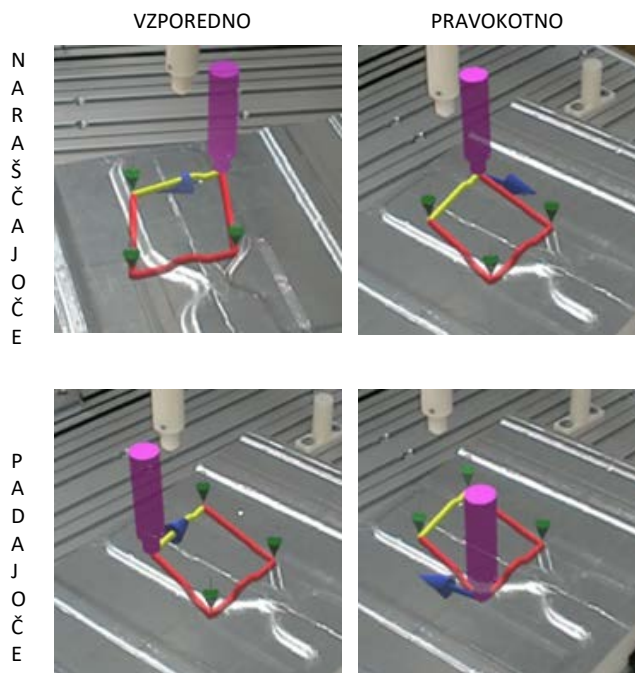


Slika 10: Izbiira izhodiščne stranice.

Ostale parametre robotske naloge določimo z izbiro tehnoloških parametrov (glej sliko 11). Z začetno usmeritvijo določimo strategijo generiranja poti po površini. Le-ta je lahko bodisi vzporedna z izbrano izhodiščno stranico ali pravokotna na njo. Naslednji parameter, ki določa robotsko pot je smer gibanja orodja med obdelavo. Premik orodja lahko poteka v smeri naraščajočega ali padajočega oglišča. Na ta način določimo tudi začetno in končno točko obdelave. Možno je spremeniti tudi nastavitve hitrosti pomika orodja, naklona orodja, ki definira odstopanje orientacije orodja od normale na površino, odmik konice orodja od površine med obdelavo ter raster skeniranja površine s katerim določimo gostoto obdelovalne poti.



Slika 11: Izbiira tehnoloških parametrov robotske naloge.



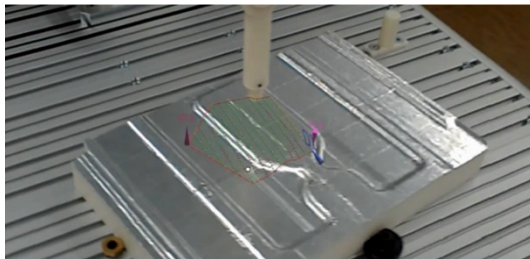
Slika 12: Hologramski prikaz izbranih tehnoloških parametrov.

Hologramski vmesnik omogoča predstavitev izbranih tehnoloških parametrov na intuitiven grafičen način (glej sliko 12). Na ta način uporabniku nazorno predstavimo na kakšen način se bo izvedla obdelovalna naloga. Na sliki 12 je prikazana grafična ponazoritev kombinacije različnih nastavitve začetne usmeritve in smeri obdelave.

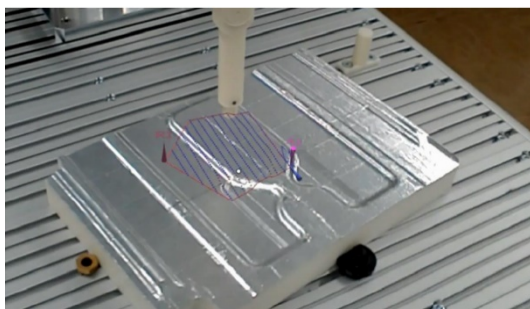
3.3 Izvedba obdelovalne naloge

Po določitvi procesnih parametrov mikrokovanja delavec sproži generiranje obdelovalnih poti, brez potrebe po uporabi CAD/CAM programskih orodij. Rezultati, ki vključujejo prikaz poteka generiranih poti

orodja za izbran del obdelovalne površine, se prikažejo tako v grafičnem uporabniškem vmesniku kot tudi preko hologramskega vmesnika. Slednji ima na voljo več načinov prikaza. Poleg prikaza generiranih točk poti, lahko le-te tudi barvno prikaže in s tem ponazori kritična območja, kjer bo potrebno zmanjšati hitrosti orodja za uspešno izvedbo naloge (glej sliko 13(a)). Z zeleno barvo ponazorimo točke, kjer bo robot lahko dosegal nastavljene hitrosti orodja, rdeča barva pa ponazarja točke, kjer bo robot ustrezno zmanjšal hitrosti za uspešno izvedbo celotne obdelovalne naloge. Grafično lahko prikažemo tudi odstopanje orientacije obdelovalnega orodja (glej sliko 13(b)) za uspešno izvedbo naloge.



(a)

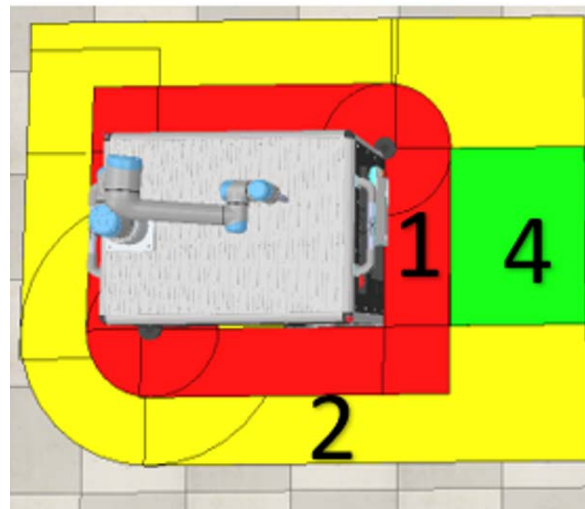


(b)

Slika 13: Prikaz generirane poti po površini obdelovanca.

Točke obarvane v modro barvo nakazujejo na ničelno odstopanje orientacije od normale. Bolj kot je točka rdeče obarvana, bolj je potrebno prilagoditi orientacijo orodja. S potrditvijo obdelovalne poti uporabnik sproži izvedbo obdelave na realnem robotu. V nasprotnem primeru, ima uporabnik možnost ponovnega definiranja obdelovalne naloge.

Med izvajanjem obdelovalne naloge robot izvaja proces avtonomno, brez potrebe po prisotnosti človeka. Za zagotavljanje varnosti ob morebitnem poseganju človeka v odprto kolaborativno celico skrbita dva varnostna laserska skenerja, ki varujeta prostor okrog delovne celice robota. Varnostna območja so definirana v skladu s standardom ISO TS 15066 (glej sliko 13). Velikost in obliko posameznih območij pa lahko po potrebi prikažemo tudi preko hologramskega vmesnika. Rdeče varnostno območje predstavlja območje visoke nevarnosti v neposredni bližini robota in obkroža celotno robotsko celico. Vstop človeka v to območje sproži varnostno nadzorovano zaustavitev robota. Kakor hitro človek zapusti to področje, robot nadaljuje s svojim delom. Rumeno varnostno območje predstavlja opozorilno področje v širši okolici robota. Ustrezna signalizacija opozarja človeka, da se nahaja v bližini robota. Daljše zadrževanje v zelenem področju pa lahko sproži programski ukaz za ustavitev obdelave in postavitve v položaj nad izhodiščno ravnino.



Slika 14: Prikaz varnostnih območij.

4 Zaključek

Kolaborativne robotske aplikacije se razvijajo v smeri fleksibilnosti in avtonomnosti, vendar trenutna stopnja tehnologije, ki je dostopna na trgu še vedno ne prinaša univerzalnih rešitev, ki bi poleg enostavnih, dopuščale fleksibilnejše izvajanje

kompleksnejših robotskih nalog. Med najkompleksnejše robotske naloge zagotovo uvrščamo procesne naloge, kjer je po navadi potrebno s konico orodja natančno slediti obliki površine. Priprava tovrstnih robotskih programov zahteva veliko vložene časa in truda ter uporabo dragih CAD/CAM programskih orodij. Tak postopek pa za maloserijsko proizvodnjo ni primeren, saj ni rentabilen.

Da bi lahko zagotovili prilagodljivo uporabo kolaborativnih robotskih sistemov tudi za potrebe tako kompleksnih robotskih nalog, je potrebno razviti namenske algoritme in prilagoditve robotskega sistema, kar bo omogočalo njihovo fleksibilno uporabo.

V okviru opisane laboratorijske aplikacije robotskega mikrokovanja smo predstavili sistem, ki omogoča enostavno definiranje robotske naloge za površinsko obdelavo geometrijsko razgibanih obdelovancev na ta način, da želeno področje obdelave določimo preko kinestetičnega vodenja kolaborativnega robota, robotska trajektorija pa se generira avtonomno brez uporabe CAD/CAM programskih orodij. Podpora naprednih tehnologij, kot je mešana resničnost, pa daje nove možnosti intuitivnega prikaza informacij in omogoča boljše razumevanje o dogajanju tudi uporabnikom, ki niso veščji programiranja robotov.

5 Zahvala

To delo je bilo delno sofinancirano v okviru projekta ROBOTool-1, OP20.03540, Republika Slovenija in Evropska unija iz Evropskega sklada za regionalni razvoj.

6 Literatura

[1] A. Hietanen, J. Latokartano, R. Pieters, M. Lanz, and J. K. Kamarainen, "AR-based interaction for

- human-robot collaborative manufacturing," *Robot Cim-Int Manuf*, vol. 63, Jun 2020, doi: 10.1016/j.rcim.2019.101891.
- [2] S. Blankemeyer, R. Wiemann, L. Posniak, C. Pregizer, and A. Raatz, "Intuitive Robot Programming Using Augmented Reality," (in English), *Proc Cirp*, vol. 76, pp. 155-160, 2018, doi: 10.1016/j.procir.2018.02.028.
- [3] *ISO 10218-1/2:2011 Robots and Robotic Devices Safety Requirements for Industrial Robots Part 1: Robots/Part 2: Robot Systems and Integration*, 2011.
- [4] *ISO/TS 15066:2016 Robots and Robotic Devices Collaborative Robots*, 2016.
- [5] R. Pučko, M. Golob, M. Divjak, S. Stradovnik, and A. Hace, "Opis laboratorijskega eksperimentalnega sistema za fleksibilno mikrokovanje s kolaborativnim robotom," Tehnično poročilo za projekt ROBOTool-1, UM-FERI, Maribor, Slovenija, 2020.
- [6] "Universal Robots." <https://www.universal-robots.com/> (accessed 3.3.2021).
- [7] J. Rudman, "Končna obdelava orodij za preoblikovanje pločevine s postopkom mikrokovanja površin," diplomsko delo, Fakulteta za strojništvo, Univerza v Mariboru, Maribor, 2017.
- [8] C. Lechner, F. Bleicher, C. Habersohn, C. Bauer, and S. Goessinger, "The use of machine hammer peening technology for smoothing and structuring of surfaces," *Annals of DAAAM for 2012 & Proceedings of the 23rd International DAAAM Symposium*, vol. 23, 2012.
- [9] J. Wied, "Oberflächenbehandlung von Umformwerkzeugen durch Festklopfen," Fachbereich Maschinenbau, Technischen Universität Darmstadt 2010.
- [10] J. Berglund, M. Liljengren, and B. G. Rosén, "On finishing of pressing die surfaces using machine hammer peening," *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 52, 2011.
- [11] "Microsoft HoloLens." <https://www.microsoft.com/en-US/hololens> (accessed 3.3.2021).
- [12] M. Golob, R. Pučko, S. Stradovnik, and A. Hace, "Predlog robotizacije in tehnološki scenarij za fleksibilno mikrokovanje s kolaborativnim robotom," Tehnično poročilo za projekt ROBOTool-1, UM-FERI, Maribor, Slovenija, 2020